

西藏南部新生代东西向伸展作用的深部岩浆作用响应

曾令森^{1,2)}, 高利娥^{1,2)}, 胡古月³⁾, 徐 倩⁴⁾, 田怡红¹⁾, 董汉文^{1,2)}, 王亚莹¹⁾,
严立龙¹⁾, 赵令浩⁵⁾, 李广旭¹⁾, 邱英龙¹⁾, 郝光明¹⁾, 王海涛⁶⁾

1)中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2)自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100037;

3)中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4)中国地质科学院, 北京 100037;

5)中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037;

6)天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387

摘 要: 随着新生代喜马拉雅山链的崛起, 西藏南部经历了显著的东西向伸展作用, 形成一系列近南北向展布的裂谷。伴随着增厚岩石圈的对流减薄或者拆沉, 软流圈上涌, 藏南岩石圈地幔和中下地壳发生顺次部分熔融作用, 形成岩石学和地球化学特征各异的岩浆岩, 具体表现为: 1)富集岩石圈地幔部分熔融, 形成碳酸质、煌斑质和超钾质岩浆岩; 2)增厚基性下地壳部分熔融, 形成高 Sr/Y 比值的花岗岩; 3)中-下地壳变沉积岩发生白云母脱水/含水部分熔融, 形成典型淡色花岗岩。这些新发现限定了藏南裂谷系的启动时限不晚于 ~30 Ma, 为解译世界上造山带和陆内伸展作用过程中大陆岩石圈深部熔融的精细模式提供了典型实例。

关键词: 硅质碳酸岩; 煌斑岩; 顺次部分熔融作用; 含水熔融作用; 伸展作用; 藏南

中图分类号: P534.6; P588.11 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2024.071906

Deep Magmatism Response to Cenozoic E–W Extension in the Southern Tibet

ZENG Lingsen^{1,2)}, GAO Li'e^{1,2)}, HU Guyue³⁾, XU Qian⁴⁾, TIAN Yihong¹⁾, DONG Hanwen^{1,2)},
WANG Yaying¹⁾, YAN Lilong¹⁾, ZHAO Linghao⁵⁾, LI Guangxu¹⁾, DI Yinglong¹⁾,
HAO Guangming¹⁾, WANG Haitao⁶⁾

1) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) MNR SinoProbe Laboratory, Beijing 100037;

3) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

4) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

5) National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

6) School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387

Abstract: With the rise of the Himalayan chain during the Cenozoic, southern Tibet experienced significant east–west extension, forming a series of north–south trending rifts. Along with the convective thinning or delamination of the thickened lithosphere, due to asthenospheric upwelling, sequential partial melting of the lithospheric mantle and middle–lower crust induced the formation of magmatic rocks with different petrological and geochemical characteristics. First, the partial melting of the enriched lithospheric mantle resulted in the formation of carbonatites, lamproites, and ultrapotassic rocks. Then, partial melting of the thickened basal lower–crust–derived granites with high Sr/Y ratio. Finally, the middle- and lower–crust metamorphic sedimentary rocks underwent fluid–fluxed or fluid–absent melting of muscovite, forming leucogranites. These new discoveries suggest that the initiation of the north–south trending rifts could have occurred as early as ~30 Ma and provide a typical example for interpreting the precise melting patterns of the continental lithosphere in orogenic belts and intracontinental extensional processes worldwide.

本文由国家重点研发计划项目(编号: 2021YFC2901901)、国家自然科学基金项目(编号: 42372070; 92055202)、第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0702)、中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(编号: J2310)和中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20221817; DD20221630)联合资助。获中国地质科学院 2023 年度十大科技进展第五名。

收稿日期: 2024-04-30; 改回日期: 2024-07-01; 网络首发日期: 2024-07-23。责任编辑: 马铭株。

第一作者简介: 曾令森, 男, 1970 年生。博士, 研究员。从事构造地质和地球化学研究。E-mail: lzeng1970@163.com。

Key words: silicocarbonatite; lamproite; sequential melting; fluid-fluxed melting; extension; Southern Tibet

岩脉是产状特殊、成分跨度大、不整合切穿围岩、与区域性构造关系密切的岩浆岩类,可以揭示不同规模的岩浆-成矿-构造作用,与大规模壳幔岩浆-成矿作用、造山带区域性或局部伸展过程的构造岩浆作用演化等具有十分密切的关系(赵志丹等, 2021)。大规模岩脉多分布在裂谷系,被认为是区域伸展构造的重要标志,它们可以揭示地幔成分特征和为相关的地球动力学演化过程提供重要线索。随着新生代喜马拉雅山链的崛起,青藏高原南部经历了显著的东西向伸展作用,构造伸展-高原隆生与深部的岩浆作用-成矿作用显示了较好的同时性(Zhao et al., 2009)。在拉萨地体和喜马拉雅造山带,分布着一系列间隔排列的南北向裂谷,被称为藏南裂谷系,从东到西有:错那—桑日、亚东—古露、尼玛—定日、申扎—定结、隆格尔等裂谷(图 1),是现今浅源地震发育区,也是新生代岩浆活动集中的地带(张进江, 2007)。在藏南裂谷系的成因机制方面,前人提出了很多模型,主要有以下几种: (1)重力垮塌模型,这个模型认为裂谷的出现是高原隆升达到最大高度的标志,认为裂谷及整个藏南裂谷系是高原隆升达到最大高度之后重力垮塌作用的结果(Molnar et al., 1978); (2)岩石圈地幔垂向对流移除模型,这个模型认为重力垮塌模型中仅仅考虑了重力势能增大引起的伸展偏应力,但是未考虑挤压力,所以这种解释是不完整的,只有与重力相关的张应力大于与碰撞相关的压应力,才能产生东西向伸展构造(England et al., 1988, 1989); (3)横向挤出模型,该模型将地堑的形成归因于高原挤出作用,认为喀喇昆仑—嘉黎断裂带(KJFZ)是块体向东挤出的边界断裂,高原向东挤出的过程中,内部形成南北向裂谷来调节东西向伸展作用(Tapponnier et al., 1982); (4)隧道流模型,这个模型认为高原岩石圈或下地壳

发生了部分熔融,这些熔融的物质向东流动,从而带动地壳产生一系列的南北向裂谷来调节深部运动(Clark et al., 2000); (5)板片撕裂模型, Yin(2000)通过力学分析,提出了分段式差异性俯冲的概念,之后有学者根据藏南高 Sr/Y 岩石研究,提出板片撕裂模型(侯增谦等, 2006)。除此之外,还有一些模型如马蹄形弯曲(Klootwijk et al., 1985),放射状扩展(Seeber et al., 1984),倾斜俯冲(McCaffrey et al., 1998),板块边界条件改变(Yin, 2000)和汇聚速率改变(王二七, 2006)等。

中新世,伴随着增厚岩石圈的对流减薄或者拆沉,软流圈上涌,供给的额外热共同促进了裂谷系内从北到南不同地区岩石圈的部分熔融作用,形成了大量不同性质的岩浆岩。在拉萨地体内,岩石圈地幔发生熔融形成 24~8 Ma 钾质-超钾质岩(Guo et al., 2019)、下地壳发生熔融作用形成 26~10 Ma 埃达克质岩(Chung et al., 2003)和 26~14 Ma 含矿斑岩(Hou et al., 2015)、地壳物质发生高温熔融作用形成 24~23 Ma 的 A 型花岗岩(Hao et al., 2019)。在喜马拉雅造山带内,沿着裂谷系发育大量的新生代淡色花岗岩和伟晶岩,是中-下地壳岩石发生深熔作用以及派生熔体经历岩浆演化的产物,蕴藏了有关地壳深熔作用和花岗岩侵位的地球化学和构造物理效应的重要信息(吴福元等, 2015; 曾令森等, 2017)。另外,喜马拉雅造山带裂谷系内报道了岩石圈地幔物质熔融作用形成的闪长岩包体(Zheng et al., 2016)和煌斑岩(Liu et al., 2021)、下地壳发生熔融作用形成的 20 Ma 高 Sr/Y 高温花岗岩(Ji et al., 2020; Lin et al., 2020)、地壳物质发生含水部分熔融作用形成的低 Rb/Sr 二云母花岗岩(Gao et al., 2014)。但是,藏南是否还存在其他可以证明岩石圈地幔发生部分熔融作用的岩石,伴随着裂谷的扩展岩石如何依次发

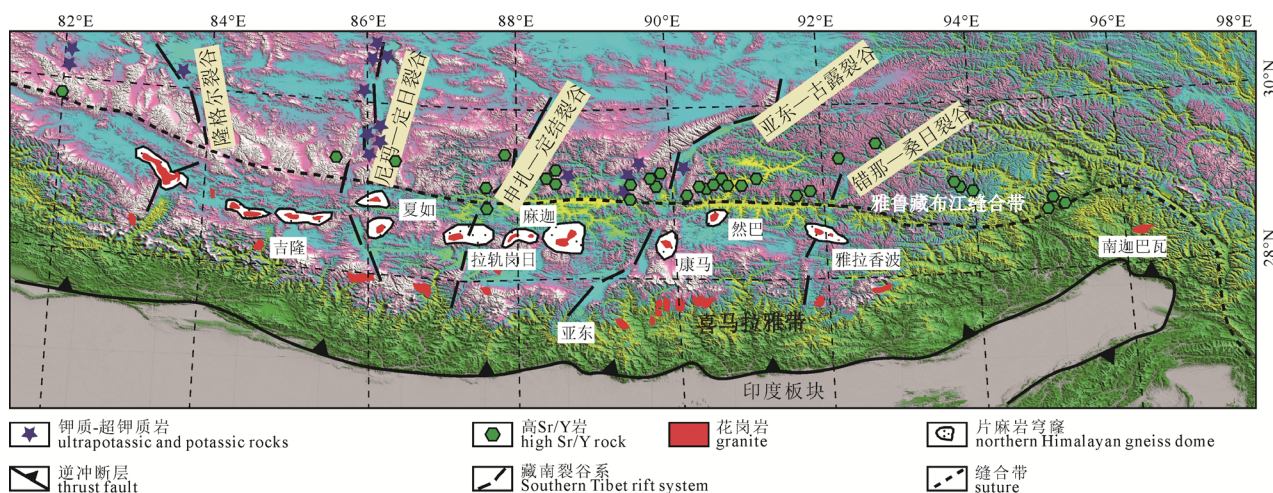


图 1 藏南地区南北向裂谷系中岩石的分布图

Fig. 1 Distribution of magmatic rocks in the north-south trending rift zone along the Southern Tibet

生部分熔融作用, 东西向伸展作用何时启动, 都是值得深入探讨的科学问题。最近几年, 我们团队在藏南裂谷系内, 分别识别出了藏南地区富集岩石圈地幔、下地壳和中地壳等不同构造层次物质发生顺次部分熔融形成的不同类型岩浆岩。这些研究成果不仅丰富了地壳深熔作用的类型, 还为深化理解花岗岩的形成机理提供了关键数据, 为限定藏南裂谷系的启动时限提供了新的依据, 为解译世界上造山带和陆内伸展作用过程中大陆岩石圈深部熔融的精细模式提供了典型实例, 为检验喜马拉雅构造演化与深熔作用的耦合关系提供了关键证据, 具体表现如下。

1 地幔物质部分熔融作用

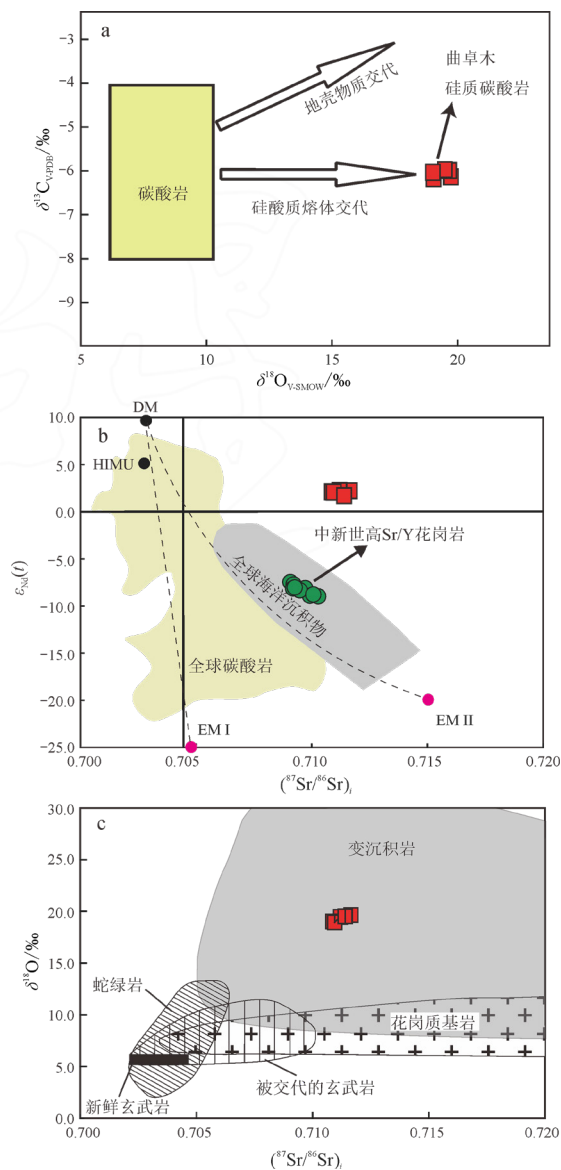
印度与亚洲大陆碰撞之后发育的岩浆作用是揭示高原岩石圈性质和浅部隆升过程等构造事件的真实记录。近年来, 不断发现的碰撞后幔源超钾质岩石和地幔包体为揭示青藏高原岩石圈地幔特征提供了重要的信息(赵志丹等, 2008), 并进一步厘定出藏南岩石圈地幔具有不均一性, 西带岩石圈地幔为古老且难熔、厚而冷的岩石圈地幔, 东带岩石圈地幔则是一个更为年轻且富集、薄而热的岩石圈地幔(Xu et al., 2017)。拉萨地体上出露的钾质-超钾质岩石年龄一般都小于 26 Ma(Zhao et al., 2009), 是岩石圈地幔部分熔融的产物, 并受到俯冲榴辉岩相地壳物质熔融所产生的富硅熔体/流体(Zhao et al., 2009; Guo et al., 2013, 2015)或俯冲洋壳沉积物熔融产生的碳酸盐熔体交代(Conticelli et al., 2015; Liu et al., 2015; Guo et al., 2019)。除了超钾质岩, 我们发现了岩石圈地幔熔融的另一类岩石: 火成碳酸岩。并且, 在亚东—谷露裂谷带中, 我们识别出更古老的钾镁煌斑岩。

1.1 硅质碳酸岩

火成碳酸岩是指主要造岩矿物为方解石、白云石、铁白云石等碳酸盐矿物, 并含有少量硅酸盐矿物的岩浆岩, 其中碳酸盐矿物的体积比超过 50%, SiO_2 的质量百分比小于 20%, 并常富集 Sr、Ba、Rb 等大离子亲石元素和 P、LREE。不同于沉积成因的碳酸盐岩, 火成碳酸岩常以岩管、岩脉、岩株状产出, 并且在空间上与黄长岩、霓霞岩、煌斑岩等有明显的共生关系。火成碳酸岩是典型的幔源岩浆岩, 主要产于板内伸展环境中, 少数产于造山带环境, 可以作为探究地幔化学成分和温压条件的“探针岩石”。

喜马拉雅造山带内, 在桑日—错那裂谷系内曲卓木地区, 硅质碳酸岩侵入到特提斯沉积岩系内。硅质碳酸岩主要由铁镁白云石(55%~65%)和石英(25%~30%)组成, 含有少量的锐钛矿、钛铁矿、铬

尖晶石、磷灰石、独居石、黄铁矿和锆石等副矿物。全岩元素地球化学数据显示, 这些硅质碳酸岩具有高 SiO_2 含量(>30%)和高的地幔元素 Cr、Co、Ni。与镁质碳酸岩相比, 硅质碳酸岩亏损高场强元素和稀土元素。硅质碳酸岩中锆石显示振荡环带, U-Pb 定年测得锆石结晶年龄为 18.4 Ma。全岩同位素地球化学显示(图 2), 硅质碳酸岩具有幔源特征的 Nd 和 C 同位素比值($\epsilon_{\text{Nd}}(t)=1.7\sim2.2$, $\delta^{13}\text{C}=-6.3\text{‰}\sim-6.0\text{‰}$), 以及壳源特征的 Sr 和 O 同位素比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7109\sim0.7117$, $\delta^{18}\text{O}=18.9\text{‰}\sim19.7\text{‰}$)。以上元素和同位素特征表明: 岩石圈地幔熔融产生的碳酸质组分上升过程中混合了地壳熔融产生的硅酸质熔体形成了曲卓木硅质碳酸岩。中新世, 随着



DM—亏损地幔; HIMU—高 m 值地幔; EM I—富集地幔一; EM II—富集地幔二。

DM—depleted mantle; HIMU—high m value mantle; EM I—enriched mantle I; EM II—enriched mantle II.

图 2 曲卓木硅质碳酸岩的同位素特征
Fig. 2 Isotopic characteristics for the Quzhuomu silicocarbonatites

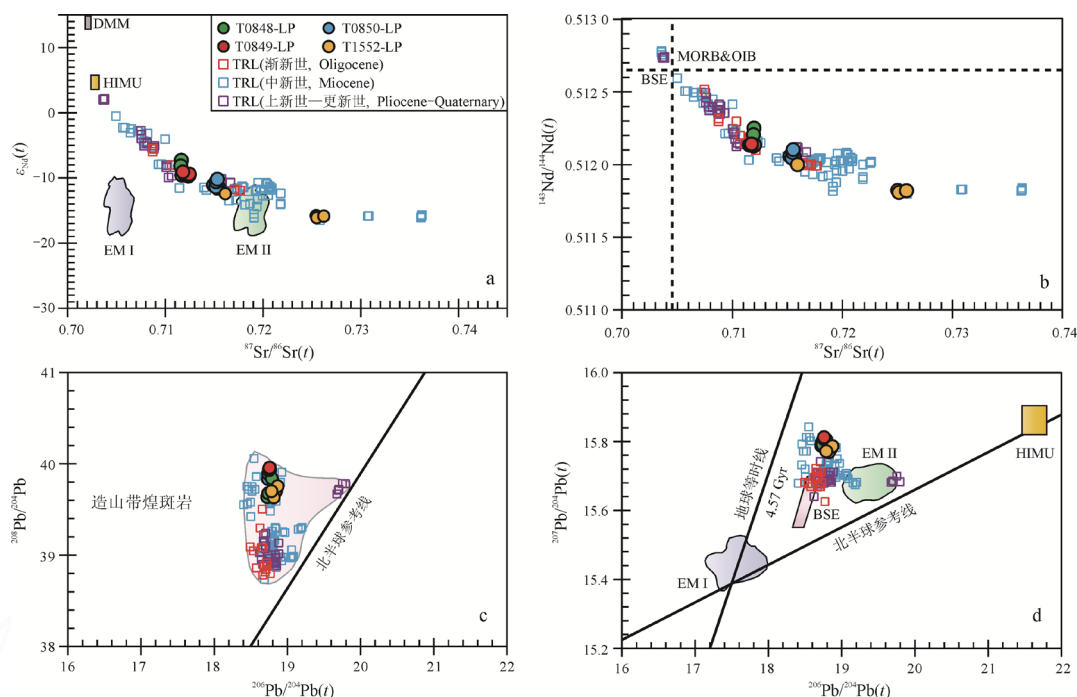
软流圈热量和物质的上涌,东西向伸展变形开启,富集岩石圈地幔发生部分熔融,上升过程中混合了地壳物质部分熔融产生的熔体,桑日—错那裂谷系至少在 19 Ma 开始启动。

1.2 钾镁煌斑岩

“钾镁煌斑岩”是一组复杂的岩石,在矿物学上与一些金伯利岩和煌斑岩相似。国际地质科学联合会在新的火成岩分类中将钾镁煌斑岩划分为一组独特的岩石,它含有斑状的镁铁质矿物,典型的斑晶为金云母、辉石和角闪石,长石只存在于基质里。在地球化学上,它们的 $K_2O/Na_2O > 3$ (摩尔比), $(K_2O+Na_2O)/Al_2O_3 > 1$ (摩尔比),即它们是超钾质和过碱性的; $K_2O/Al_2O_3 > 0.8$ (摩尔比)且常大于 1; 通常其 FeO 和 CaO 都小于 10 wt.%, TiO_2 在 1 wt.%~7 wt.%之间, Ba 大于 $2\,000 \times 10^{-6}$, Sr 大于 $1\,000 \times 10^{-6}$, Zr 大于 500×10^{-6} , La 大于 200×10^{-6} (Le Maitre et al., 2002)。在所有幔源碱性岩石中,钾镁煌斑岩是最奇特的一类,它们极度富集不相容大离子亲石元素 (LILE),如元素 K、Ba、Sr、Rb 等。除此之外,钾镁煌斑岩的挥发分含量较高,被认为是岩浆产生和侵位的时间较短所致 (Kelley et al., 2000; Williams et al., 2004),大多数钾镁煌斑岩的地幔源区发生的交代作用是多期、阶段性的 (Mitchell et al., 1991)。根据产出环境分为板内钾镁煌斑岩和后碰撞钾镁煌斑岩,二者的同位素组成有着极为明显的不同。造山

带钾镁煌斑岩是由富集的大陆岩石圈地幔发生低程度部分熔融形成的,是理解地幔深部富集过程的重要途径 (Prelević et al., 2007, 2010; Casalini et al., 2022)。通过研究钾镁煌斑岩可以揭示大陆尺度的构造过程,为我们理解大陆岩石圈地幔的地球动力学演化过程、板块俯冲和后碰撞岩浆作用提供了不同证据并发挥了重要作用。

碰撞后钾质-超钾质岩浆作用广泛分布在阿尔卑斯—喜马拉雅造山带内 (Prelević et al., 2013; Liu et al., 2014a, b; Guo et al., 2015; Cheng et al., 2017; 赵志丹等, 2018),在拉萨地体内,新生代钾质-超钾质岩浆岩在印度—雅鲁藏布缝合带以北呈线状分布 (图 1)。尼木钾镁煌斑岩出露于拉萨地体南部亚东—谷露裂谷内,位于拉萨市尼木县城附近,产状近南北,呈一系列脉状产出 (T0848-LP、T0849-LP、T0850-LP、T0852-LP),侵入位于曲林复合岩体中,侵入主体为粗粒花岗斑岩,同时又被闪长玢岩侵入。尼木钾镁煌斑岩为斑状结构,主要斑晶为单斜辉石和金云母,部分单斜辉石发育有极好的环带结构,副矿物包括榍石、磷灰石、锆石、重晶石和磁铁矿。锆石和榍石 U-Pb 定年测得尼木钾镁煌斑岩形成于 30 Ma,在全岩地球化学上具有高的地幔相容元素 Cr、Ni、Co,强烈富集轻稀土元素,亏损重稀土元素,富集大离子亲石元素,有显著的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常,以及出现显著的 Th-U 分馏和 Nb-Ta 分馏现



TRL—特提斯域钾镁煌斑岩; DMM—亏损的洋中脊玄武岩地幔; HIMU—高 m 值地幔; BSE—总体硅酸盐地球; MORB—洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; EM I—富集地幔一; EM II—富集地幔二。

TRL—Tethyan realm lamproites; DMM—depleted MORB mantle; HIMU—high m value mantle; BSE—bulk silicate earth; MORB—mid-ocean ridge basalts; OIB—ocean island basalts; EM I—enriched mantle I; EM II—enriched mantle II.

图 3 尼木钾镁煌斑岩的同位素特征

Fig. 3 Isotopic characteristics for the Nyemo lamprotites

象。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)=0.711\ 6\sim0.725\ 9$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)=-9.0\sim-15.6$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)=18.64\sim18.83$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)=15.77\sim15.81$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(t)=39.53\sim39.83$ (图 3), 表明其来自于受硅酸盐熔体交代的大陆岩石圈地幔低程度部分熔融。与特提斯域其他钾镁煌斑岩相比, 尼木钾镁煌斑岩的大陆岩石圈地幔源区受熔体交代作用远高于特提斯域其他地区的钾镁煌斑岩源区; 尼木钾镁煌斑岩与藏南钾质-超钾质岩石在年龄和地球化学上的差异可以解释为在藏南裂谷系初始形成时, 由于熔体交代作用, 富沃组分优先熔融; 部分高 Sr/Y 岩石, 特别是其中的高 Ba 岩石, 可能来自于经大陆岩石圈地幔来源熔体改造过的增厚基性下地壳。尼木钾镁煌斑岩揭示了亚东-谷露裂谷可能在 30 Ma 开始形成(Tian et al., 2023)。

2 地壳物质部分熔融作用

喜马拉雅新生代淡色花岗岩, 是世界上最年轻的淡色花岗岩, 是中-下地壳岩石发生深熔作用以及派生熔体经历岩浆演化的产物, 蕴藏了有关地壳深熔作用和花岗岩侵位的地球化学和构造物理效应的重要信息(吴福元等, 2015; 曾令森等, 2017)。自 20 世纪 80 年代以来, 国内外学者对喜马拉雅新生代淡色花岗岩的形成时代、岩石学特征、地球化学特征、形成机制和构造动力学意义等方面开展了大量的研究, 取得了丰硕的成果(吴福元等, 2015)。随着研究程度的提高和测试技术的快速发展, 一系列新的研究成果揭示了更加丰富的深熔作用(Prince et al., 2001; Zhang et al., 2004; Ding et al., 2005; Lee et al., 2007; Zeng et al., 2009; Liu et al., 2014; Liu et al., 2016; Gao et al., 2017, 2023a, b; Ji et al., 2020; Lin et al., 2020; Fan et al., 2021; Gao et al., 2021; He et al., 2021; Cao et al., 2022; Chen et al., 2022; Gu et al., 2022; Liu S Q et al., 2022a, b; Liu X C et al., 2022), 为准确反演喜马拉雅造山带的造山过程提供了关键的新数据。最近十年, 在喜马拉雅高分异淡色花岗岩和伟晶岩中发现富集 Li 、 Be 、 Nb 、 Ta 、 Sn 、 Rb 、 Cs 等关键金属元素, 稀有金属成矿潜力大, 是未来矿产勘探的重要靶区, 很可能成为我国新的重要稀有金属成矿带(王汝成等, 2017; 秦克章等, 2021; 吴福元等, 2021; 李光明等, 2022)。喜马拉雅新生代淡色花岗岩的形成时间尺度从~45 Ma 一直到现今, 且各主要时代的淡色花岗岩在地球化学性质上表现出较大的差异性, 与形成的深部地质过程紧密相关。这些淡色花岗岩为了解中下地壳物质在碰撞造山过程中的物理和化学行为提供了重要的岩石探针。厘定这些淡色花岗岩的产出状态、形成时限、岩石学、地球化学和地球物理性质及其成矿效应等是揭示碰撞造山带构造演化过程中, 变质、岩浆和

构造作用之间的互馈关系, 浅表作用和深部地壳地质作用之间互动关系的关键, 为未来关键金属的勘查提供重要理论支撑。

2.1 下地壳物质部分熔融作用

早中新世, 伴随着软流圈上涌和裂谷系开启, 拉萨地体的岩石圈地幔与加厚下地壳发生部分熔融, 形成大量钾质-超钾质岩和埃达克岩。在藏南裂谷系向南延伸过程中, 随着裂谷开启和热量上涌, 中下地壳物质是否会发生部分熔融作用, 产生熔体的地球化学特征又如何, 是亟待深入研究的重要课题。而喜马拉雅造山带特殊的地壳结构和相对丰富的物质组成, 为研究该课题提供了理想的天然实验室。

雅拉香波片麻岩穹窿位于藏南裂谷系内, 由至少四组中新世高 Sr/Y 比值花岗岩组成(T0394、T0725-LG、TYS-10、T0468), 分别形成于 20.4 Ma、18.9 Ma、17.7 Ma 和 17.1 Ma。与喜马拉雅中新世淡色花岗岩相比, 这些花岗岩具有低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ (0.709 1~0.714 9)和高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-11.1 ~ -7.7)同位素比值(图 4)。地球化学数据表明, 它们为富钠过铝花岗岩, 具有高 Sr/Y 和 La/Yb 比值, $\text{Sr}-\text{Nd}$ 同位素特征与始新世二云母花岗岩相似。随着结晶年龄的减小, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 Sr/Y 比值减小, 但 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 和 Rb/Sr 比值增加。以上元素地球化学成分的系统变化无法用单一的源区来解释。在造山带伸展作用阶段, 伴随着热量的上升, 由于温压条件的改变, 不同深度陆壳物质发生部分熔融作用, 理论上会产生矿物组成和地球化学特征迥异的共生花岗岩, Holtz et al.(1991)将这种复杂的深熔作用叫做顺次部分熔融作用。然而由于发生顺次部分熔融作用所需的构造地质条件比较苛刻, 全世界目前仅有两例报道。正因如此, 随着陆壳伸展区域热量上涌, 顺次部分熔融作用产生熔体的地球化学特征如何变化还未被系统地研究。雅拉香波穹窿内, 微量元素和同位素系统变化的中新世淡色花岗岩应该是顺次部分熔融作用的产物: 基性下地壳先发生熔融作用, 接着浅部的变泥质岩发生熔融作用, 此地区东西向的伸展作用应该至少 20 Ma 开始启动。

2.2 中上地壳物质部分熔融作用

在系统地岩相学观察, 全岩元素和同位素(Sr 和 Nd)研究的基础上, Gao et al.(2014, 2023b)发现马山、错那、珠峰二云母花岗岩具有较高的 Ca 、 Sr 、 Ba , 较低的 Rb 和 Rb/Sr 比值, 且随着 Ba 浓度的增加, Rb/Sr 比值保持不变(图 5), 与白云母含水部分熔融作用的特征(Inger et al., 1993)一致, 结合理论计算和实验岩石学的结果(Knesel et al., 2002), 提出二云母花岗岩是白云母含水熔融作用的产物。通过

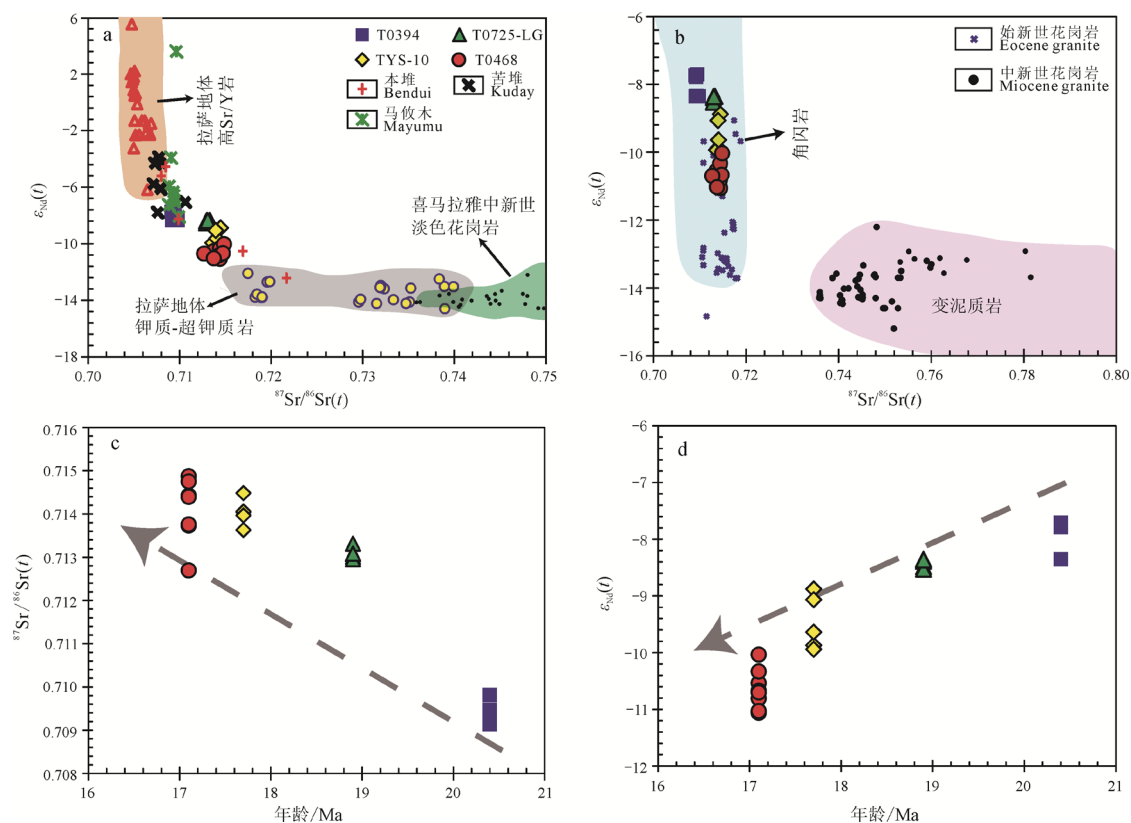


图 4 南北向裂谷系中不同岩石的 Sr-Nd 同位素特征
Fig. 4 Sr-Nd isotope systematics of the magmatic rocks in the NSTR

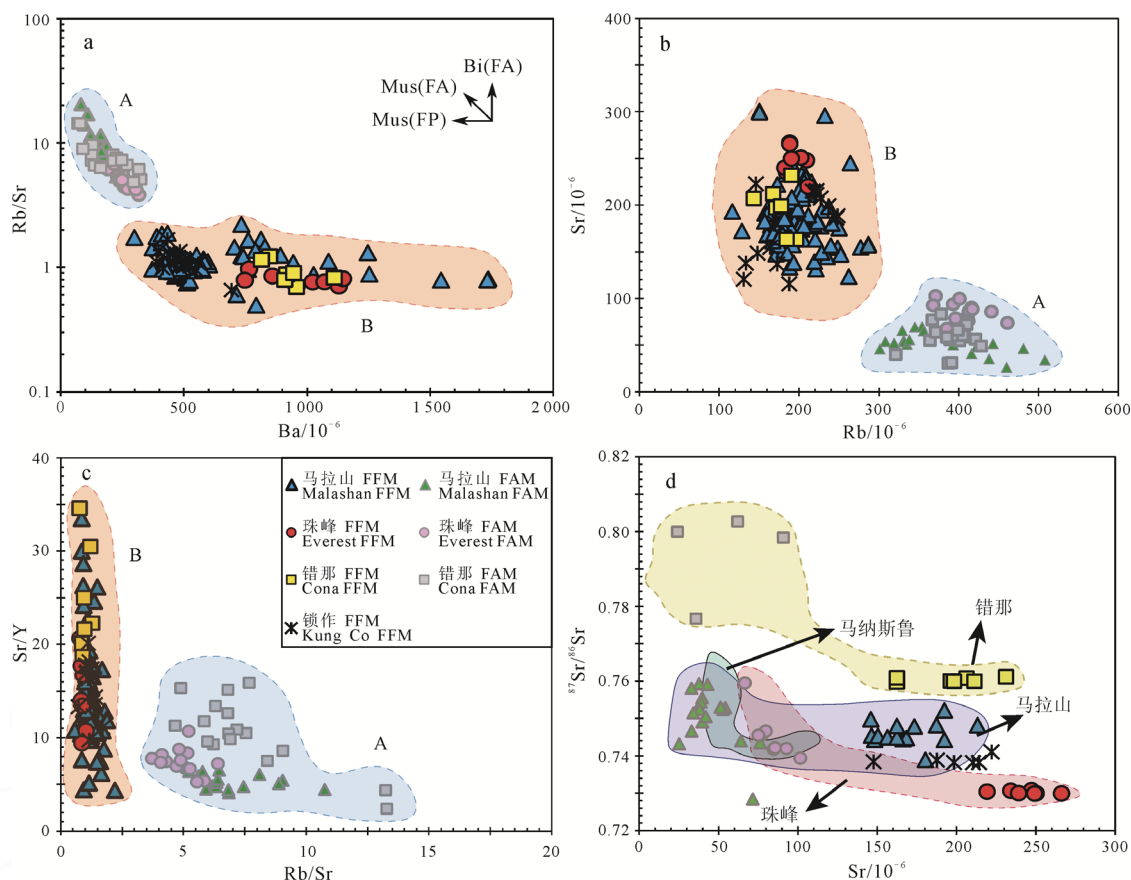


图 5 喜马拉雅造山带中上地壳变沉积岩中白云母含水熔融作用(FFM)和白云母脱水熔体作用(FAM)形成花岗岩的 Ba-Rb/Sr (a), Rb-Sr (b), Rb/Sr-Sr/Y (c)和 Sr- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (d)系统关系
Fig. 5 Ba-Rb/Sr (a), Rb-Sr (b), Rb/Sr-Sr/Y (c), and Sr- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (d) systematics for the two types of leucogranites derived from fluid-fluxed melting of muscovite (FFM) and fluid-absent melting of muscovite (FAM) in the metasedimentary rocks along the Himalayan orogenic belt

与白云母脱水熔融形成的淡色花岗岩对比,发现这两类不同熔融作用形成的熔体不仅在主量元素(K、Na、Ca),大离子亲石元素(Rb、Sr、Ba)和 Sr 同位素组成上明显不同,而且在高场强元素(Zr、Hf、Nb、Ta、Th、U),轻稀土元素,Hf 和 Pb 同位素组成也存在着明显差异性。与脱水部分熔融作用形成的熔体相比,含水熔融作用形成的熔体具有较高的 Ca、Sr、Ba、Zr、Hf、Th 和 LREE,低的 Rb、Nb、Ta 和 U;较高的 Zr/Hf 比值, Eu/Eu*, Nd/Nd* 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$; 但 Rb/Sr、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和 Hf 同位素组成较低(Gao et al., 2017)。在无水条件下,部分熔融反应为: $22\text{Ms}+7\text{Pl}+8\text{Qtz}=25\text{Melt}+5\text{Kfs}+5\text{Sil}+2\text{Bt}$; 在水饱和条件下,部分熔融反应为: $9\text{Ms}+15\text{Pl}+7\text{Qtz}+x\text{H}_2\text{O}=31\text{Melt}$; 其中 Ms=白云母, Pl=斜长石, Qtz=石英, Kfs=钾长石, Sil=矽线石, Bt=黑云母, Melt=熔体(Patiño Douce et al., 1998)。综合分析部分熔融反应方程式和熔体的地球化学特征,可以得出: (1)白云母和长石参与部分熔融作用的比例控制了熔体的 Ca、Rb、Sr、Ba、Nb、Ta、Eu/Eu*、Rb/Sr 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, (2)继承性锆石的差异性溶解控制了熔体的 Zr、Hf、Zr/Hf、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, (3)继承性独居石的溶解控制了熔体的 Th、LREE、Nd/Nd* 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 。

这些数据表明,对于同一母岩,不同类型的部分熔融作用可形成性质各异的熔体,这些元素之间的系统差异性逐渐发展为鉴定部分熔融作用类型的基本工具。这些发现揭示了在喜马拉雅碰撞造山带构造演化过程中,变泥质岩白云母含水部分熔融作用是另一重要的中下地壳的物理和化学响应方式。

主中央逆冲断层(MCT)是高喜马拉雅带和低喜马拉雅带的构造边界。MCT 将高喜马拉雅带的高级变质岩逆冲到低喜马拉雅带的低级变质岩上(图 6)。Prince et al.(2001)首次发现了含水熔融作用形成的二云母花岗岩,并提出:低喜马拉雅带低级变质岩的流体渗入上覆的高喜马拉雅结晶岩系并激发了含水部分熔融作用。Guo et al.(2012)报道了喜马拉雅淡色花岗岩的全岩主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素数据,也认为来源于低喜马拉雅岩系的流体参与了喜马拉雅淡色花岗岩的形成。Cheng et al.(2021)报道了纳木那尼穹窿内花岗岩中电气石的原位 B 同位素数据, Liu et al.(2022a)报道了日玛那地区电气石和白云母的原位 B 同位素数据,并进行了相平衡模拟(Liu et al., 2022b),认为低喜马拉雅岩系派生的流体参与了含水熔融作用。在这些研究成果基础上,我们认为含水部分熔融作用可能与南北向裂谷

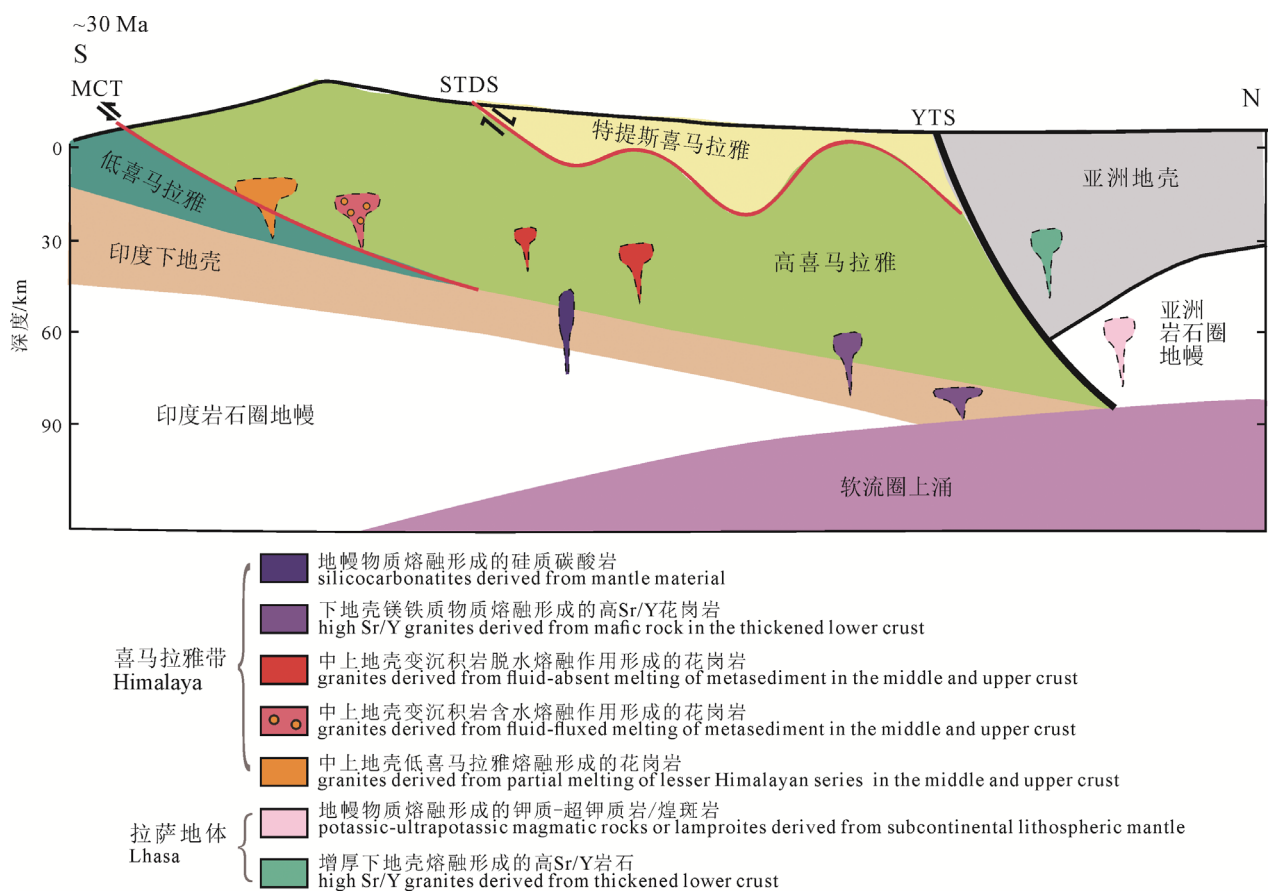


图 6 藏南裂谷中东西向伸展作用的深部岩浆作用模型
Fig. 6 Model for E-W extension-induced deep magmatism within the Trending Rift of southern Tibet

系(NSTR)的活动密切相关。在 NSTR 的开启和东西向伸展变形中软流圈上涌,低喜马拉雅岩片受热烘烤发生脱水变质并释放流体,深部流体沿着裂谷上行,促使高喜马拉雅岩片发生含水部分熔融作用。

含水熔融作用形成的淡色花岗岩主要沿着 NSTR 分布,可以用来约束裂谷初始开启的时限。Mitsuishi et al.(2012)对锁作地区开展了详细野外构造调查和遥感地质学分析,提出锁作淡色花岗岩的侵位和 NSTR 是同期的,这表明锁作裂谷~19 Ma 就已经开始活动。Langille et al.(2012)对翁波地区的淡色花岗岩解析,提出翁波裂谷的启动时代为 23 Ma。我们团队综合了翁波、马纳苏鲁、锁作、洛扎、珠峰和错那地区含水熔融作用形成淡色花岗岩的野外构造和地球化学特征,得出通过含水熔融作用形成的淡色花岗岩年代可以推断裂谷系在 ~26 Ma 开始启动(Gao et al., 2023b)。

3 结论

后碰撞阶段,印度-欧亚大陆的持续汇聚导致藏南地区岩石圈显著加厚,最终伴随着增厚岩石圈的对流减薄或者拆沉,软流圈上涌加热藏南岩石圈,从岩石圈地幔至中下地壳层次的岩石依次发生部分熔融作用,形成岩石学和地球化学特征各异的岩浆岩,约束了藏南东西向的伸展作用的启动时限不晚于 30 Ma(图 6)。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC2901901), National Natural Science Foundation of China (Nos. 42372070 and 92055202), the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition Program (No. 2019QZKK0702), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. J2310), and China Geological Survey (Nos. DD20221817 and DD20221630).

参考文献:

- 侯增谦, 赵志丹, 高永丰, 等, 2006. 印度大陆板片前缘撕裂与分段俯冲: 来自冈底斯新生代火山-岩浆作用证据[J]. 岩石学报, 22(4): 761-774.
- 李光明, 付建刚, 郭伟康, 等, 2022. 西藏喜马拉雅成矿带东段嘎波伟晶岩型锂矿的发现及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 41(6): 1109-1119.
- 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 等, 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义[J]. 岩石学报, 37(11): 3277-3286.
- 王二七, 2006. 青藏高原新生代地壳变形对同碰撞岩浆侵位的制约[J]. 岩石学报, 22(3): 558-566.
- 王汝成, 吴福元, 谢磊, 等, 2017. 藏南喜马拉雅淡色花岗岩稀有金属成矿作用初步研究[J]. 中国科学: 地球科学, 47(8):

871-880.

- 吴福元, 刘志超, 刘小驰, 等, 2015. 喜马拉雅淡色花岗岩[J]. 岩石学报, 31(1): 1-36.
- 吴福元, 王汝成, 刘小驰, 等, 2021. 喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破[J]. 岩石学报, 37(11): 3261-3276.
- 曾令森, 高利娥, 2017. 喜马拉雅碰撞造山带新生代地壳深熔作用与淡色花岗岩[J]. 岩石学报, 33(5): 1420-1444.
- 张进江, 2007. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述[J]. 地质通报, 26(6): 639-649.
- 赵志丹, 刘栋, 王青, 等, 2018. 锆石微量元素及其揭示的深部过程[J]. 地学前缘, 25(6): 124-135.
- 赵志丹, 莫宣学, 孙晨光, 等, 2008. 青藏高原南部地幔包体的发现及其意义[J]. 岩石学报, 24(2): 193-202.
- 赵志丹, 唐演, 朱弟成, 等, 2021. 青藏高原南部岩脉分布及其研究意义[J]. 岩石学报, 37(11): 3399-3412.

References:

- CAO Huawen, PEI Qiuming, SANTOSH M, et al., 2022. Himalayan leucogranites: A review of geochemical and isotopic characteristics, timing of formation, genesis, and rare metal mineralization[J]. Earth-Science Reviews, 234: 104229.
- CASALINI M, AVANZINELLI R, TOMMASINI S, et al., 2022. Petrogenesis of Mediterranean lamproites and associated rocks: the role of overprinted metasomatic events in the post-collisional lithospheric upper mantle[J]. Geological Society, London, Special Publications, 513(1): 271-296.
- CHEN Han, HU Guyue, ZENG Lingsen, et al., 2022. Miocene Crustal Anatexis of Paleozoic Orthogneiss in the Zhada Area, Western Himalaya[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 96(3): 954-971.
- CHENG Lining, ZHANG Chao, LIU Xiaochi, et al., 2021. Significant boron isotopic fractionation in the magmatic evolution of Himalayan leucogranite recorded in multiple generations of tourmaline[J]. Chemical Geology, 571: 120194.
- CHENG Zhihui, GUO Zhengfu, 2017. Post-collisional ultrapotassic rocks and mantle xenoliths in the Sailipu volcanic field of Lhasa terrane, South Tibet: Petrological and geochemical constraints on mantle source and geodynamic setting[J]. Gondwana Research, 46: 17-42.
- CHUNG Sunlin, LIU Dunyi, JI Jianqing, et al., 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. Geology, 31(11): 1021-1024.
- CLARK M K, ROYDEN L H, 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. Geology, 28(8): 703-706.
- CONTICELLI S, AVANZINELLI R, AMMANNATI E, et al., 2015. The role of carbon from recycled sediments in the origin of ultrapotassic igneous rocks in the Central Mediterranean[J]. Lithos, 232: 174-196.
- DING Lin, KAPP P, WAN Xiaoqiao, 2005. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet[J]. Tectonics, 24(3): TC3001.

- ENGLAND P, HOUSEMAN G, 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B12): 17561-17579.
- ENGLAND P, HOUSEMAN G, 1988. The mechanics of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 326: 301-320.
- FAN Yunsong, ZHANG Jinjiang, LIN Chao, et al., 2021. Miocene granitic magmatism constrains the early E-W extension in the Himalayan Orogen: A case study of Kung Co leucogranite[J]. *Lithos*, 398-399: 106295.
- GAO Li'e, ZENG Lingsen, ASIMOW P D, 2017. Contrasting geochemical signatures of fluid-absent versus fluid-fluxed melting of muscovite in metasedimentary sources: The Himalayan leucogranites[J]. *Geology*, 45(1): 39-42.
- GAO Li'e, ZENG Lingsen, ZHAO Linghao, et al., 2023a. Sequential melting of deep crustal source rocks in a rift system: An example from southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 618: 121295.
- GAO Li'e, ZENG Lingsen, ZHAO Linghao, et al., 2023b. Fluid-fluxed melting in the Himalayan orogenic belt: Implications for the initiation of E-W extension in southern Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 136(3-4): 989-1002.
- GAO Li'e, ZENG Lingsen, 2014. Fluxed melting of metapelite and the formation of Miocene high-CaO two-mica granites in the Malashan gneiss dome, southern Tibet[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 130: 136-155.
- GAO Peng, ZHENG Yongfei, ZHAO Zifu, et al., 2021. Source diversity in controlling the compositional diversity of Cenozoic granites in the Tethyan Himalaya[J]. *Lithos*, 388-389: 106072.
- GU Daxiang, ZHANG Jinjiang, LIN Chao, et al., 2022. Anatexis and resultant magmatism of the Ama Drime Massif: Implications for Himalayan mid-Miocene tectonic regime transition[J]. *Lithos*, 424-425: 106773.
- GUO Zhengfu, WILSON M, 2012. The Himalayan leucogranites: Constraints on the nature of their crustal source region and geodynamic setting[J]. *Gondwana Research*, 22(2): 360-376.
- GUO Zhengfu, WILSON M, 2019. Late Oligocene-early Miocene transformation of postcollisional magmatism in Tibet[J]. *Geology*, 47(8): 776-780.
- GUO Zhengfu, WILSON M, ZHANG Maoliang, et al., 2013. Post-collisional, K-rich mafic magmatism in South Tibet: Constraints on Indian slab-to-wedge transport processes and plateau uplift[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165(6): 1311-1340.
- GUO Zhengfu, WILSON M, ZHANG Maoliang, et al., 2015. Post-collisional Ultrapotassic Mafic Magmatism in South Tibet: Products of Partial Melting of Pyroxenite in the Mantle Wedge Induced by Roll-back and Delamination of the Subducted Indian Continental Lithosphere Slab[J]. *Journal of Petrology*, 56(7): 1365-1406.
- HAO Lulu, WANG Qiang, WYMAN D A, et al., 2019. First identification of postcollisional A-type magmatism in the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Geology*, 47(2): 187-190.
- HE Shaoxiong, LIU Xiaochi, YANG Lei, et al., 2021. Multistage magmatism recorded in a single gneiss dome: Insights from the Lhagoi Kangri leucogranites, Himalayan orogen[J]. *Lithos*, 398-399: 106222.
- HOLTZ F, BARBEY P, 1991. Genesis of Peraluminous Granites II. Mineralogy and Chemistry of the Tourem Complex (North Portugal). Sequential Melting vs. Restite Unmixing[J]. *Journal of Petrology*, 32(5): 959-978.
- HOU Zengqian, DUAN Lianfeng, LU Yongjun, et al., 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Economic Geology*, 110(6): 1541-1575.
- HOU Zengqian, ZHAO Zhidan, GAO Yongfeng, et al., 2006. Tearing and dischronal subduction of the Indian continental slab: Evidence from Cenozoic Gangdese volcano-magmatic rocks in South Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 761-774(in Chinese with English abstract).
- INGER S, HARRIS N, 1993. Geochemical constraints on leucogranite magmatism in the Langtang Valley, Nepal Himalaya[J]. *Journal of Petrology*, 34(2): 345-368.
- JI Weiqiang, WU Fuyuan, LIU Xiaochi, et al., 2020. Pervasive Miocene melting of thickened crust from the Lhasa terrane to Himalaya, southern Tibet, and its constraint on generation of Himalayan leucogranite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 278: 137-156.
- KELLEY S P, WARTHON J A, 2000. Rapid kimberlite ascent and the significance of Ar-Ar ages in xenolith phlogopites[J]. *Science*, 289(5479): 609-611.
- KLOOTWIJK C T, CONAGHAN P J, POWELL C M, 1985. The Himalayan Arc: Large-scale continental subduction, oroclinal bending and back-arc spreading[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 75(2-3): 167-183.
- KNESEL K M, DAVIDSON J P, 2002. Insights into collisional magmatism from isotopic fingerprints of melting reactions[J]. *Science*, 296(5576): 2206-2208.
- LANGILLE J M, JESSUP M J, COTTLE J M, et al., 2012. Timing of metamorphism, melting and exhumation of the Leo Pargil dome, northwest India[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(8): 769-791.
- LE MAITRE R, STRECKEISEN A, LE BAS M, 2002. *Igneous Rocks*[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- LEE J, WHITEHOUSE M J, 2007. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages[J]. *Geology*, 35(1): 45-48.
- LI Guangming, FU Jiangang, GUO Weikang, et al., 2022. Discovery of the Gabo granitic pegmatite-type lithium deposit in the Kulagangri Dome, eastern Himalayan metallogenic, and its

- prospecting implication[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1109-1119(in Chinese with English abstract).
- LIN Chao, ZHANG Jingjiang, WANG Xiaoxian, et al., 2020. Oligocene initiation of the South Tibetan Detachment System: Constraints from syn-tectonic leucogranites in the Kampa Dome, Northern Himalaya[J]. *Lithos*, 354-355: 105332.
- LIU Dong, ZHAO Zhidan, ZHU Dicheng, et al., 2014a. Zircon xenocrysts in Tibetan ultrapotassic magmas: Imaging the deep crust through time[J]. *Geology*, 42(1): 43-46.
- LIU Dong, ZHAO Zhidan, ZHU Dicheng, et al., 2014b. Postcollisional potassic and ultrapotassic rocks in southern Tibet: Mantle and crustal origins in response to India-Asia collision and convergence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 207-231.
- LIU Dong, ZHAO Zhidan, ZHU Dicheng, et al., 2015. Identifying mantle carbonatite metasomatism through Os-Sr-Mg isotopes in Tibetan ultrapotassic rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 430: 458-469.
- LIU Shuaiqi, ZHANG Guibin, ZHANG Lifei, et al., 2022a. Boron isotopes of tourmalines from the central Himalaya: Implications for fluid activity and anatexis in the Himalayan Orogen[J]. *Chemical Geology*, 596: 120800.
- LIU Shuaiqi, ZHANG Guibin, ZHANG Lifei, et al., 2022b. Diverse anatexis in the main central thrust zone, eastern Nepal: Implications for melt evolution and exhumation process of the Himalaya[J]. *Journal of Petrology*, 63(3): egac003.
- LIU Xiaochi, WU Fuyuan, KOHN M J, et al., 2022. Plutonic-subvolcanic connection of the Himalayan leucogranites: Insights from the Eocene Lunze complex, southern Tibet[J]. *Lithos*, 434-435: 106939.
- LIU Xiaochi, WU Fuyuan, YU Liangjun, et al., 2016. Emplacement age of leucogranite in the Kampa Dome, southern Tibet[J]. *Tectonophysics*, 667: 163-175.
- LIU Zhichao, WANG Jiangang, LIU Xiaochi, et al., 2021. Middle Miocene ultrapotassic magmatism in the Himalaya: A response to mantle unrooting process beneath the orogen[J]. *Terra Nova*, 33(3): 240-251.
- LIU Zhichao, WU Fuyuan, JI Weiqiang, et al., 2014. Petrogenesis of the Ramba leucogranite in the Tethyan Himalaya and constraints on the channel flow model[J]. *Lithos*, 208-209: 118-136.
- MCCAFFREY R, NABELEK J, 1998. Role of oblique convergence in the active deformation of the Himalayas and Southern Tibet Plateau[J]. *Geology*, 26(8): 691.
- MITCHELL R H, BERGMAN S C, 1991. *Petrology of lamproites*[M]. New York: Plenum Press.
- MITSUISHI M, WALLIS S R, AOYA M, et al., 2012. E-W extension at 19 Ma in the Kung Co area, S. Tibet: Evidence for contemporaneous E-W and N-S extension in the Himalayan orogen[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 325-326: 10-20.
- MOLNAR P, TAPPONNIER P, 1978. Active tectonics of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B11): 5361-5375.
- PATÍÑO DOUCE A E, HARRIS N, 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis[J]. *Journal of Petrology*, 39(4): 689-710.
- PRELEVIĆ D, FOLEY S F, 2007. Accretion of arc-oceanic lithospheric mantle in the Mediterranean: Evidence from extremely high-Mg olivines and Cr-rich spinel inclusions in lamproites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(1-2): 120-135.
- PRELEVIĆ D, JACOB D E, FOLEY S F, 2013. Recycling plus: A new recipe for the formation of Alpine-Himalayan orogenic mantle lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 362: 187-197.
- PRELEVIĆ D, STRACKE A, FOLEY S F, et al., 2010. Hf isotope compositions of Mediterranean lamproites: Mixing of melts from asthenosphere and crustally contaminated mantle lithosphere[J]. *Lithos*, 119(3-4): 297-312.
- PRINCE C, HARRIS N, VANCE D, 2001. Fluid-enhanced melting during prograde metamorphism[J]. *Journal of the Geological Society*, 158(2): 233-241.
- QIN Kezhang, ZHAO Junxing, HE Changtong, et al., 2021. Discovery of the Qongjiagang giant lithium pegmatite deposit in Himalaya, Tibet, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3277-3286(in Chinese with English abstract).
- SEEBER L, ARMBRUSTER J G, 1984. Some elements of continental subduction along the Himalayan front[J]. *Tectonophysics*, 105(1-4): 263-278.
- TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 10(12): 611-616.
- TIAN Yihong, ZENG Lingsen, SHEN Yu, et al., 2023. Melting a melt-metasomatized subcontinental lithospheric mantle: Evidence from Oligocene lamproites within the Gangdese batholith, southern Tibet[J]. *Lithos*, 448-449: 107163.
- WANG Erqi, 2006. Cenozoic deformation of the Tibetan Plateau: Constraints on emplacement of syn-collisional magma[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 558-566(in Chinese with English abstract).
- WANG Rucheng, WU Fuyuan, XIE Lei, et al., 2017. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 47(8): 871-880(in Chinese).
- WILLIAMS H M, TURNER S P, PEARCE J A, et al., 2004. Nature of the source regions for post-collisional, potassic magmatism in southern and northern Tibet from geochemical variations and inverse trace element modelling[J]. *Journal of Petrology*, 45(3): 555-607.
- WU Fuyuan, LIU Zhichao, LIU Xiaochi, et al., 2015. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 1-36(in

Chinese with English abstract).

- WU Fuyuan, WANG Rucheng, LIU Xiaochi, et al., 2021. New breakthroughs in the studies of Himalayan rare-metal mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3261-3276(in Chinese with English abstract).
- XU Bo, GRIFFIN W L, XIONG Qing, et al., 2017. Ultrapotassic rocks and xenoliths from South Tibet: Contrasting styles of interaction between lithospheric mantle and asthenosphere during continental collision[J]. *Geology*, 45(1): 51-54.
- YIN An, 2000. Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B9): 21745-21759.
- ZENG Lingsen, GAO Li'e, 2017. Cenozoic crustal anatexis and the leucogranites in the Himalayan collisional orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1420-1444(in Chinese with English abstract).
- ZENG Lingsen, LIU Jing, GAO Li'e, et al., 2009. Early Oligocene crustal anatexis in the Yardoi gneiss dome, southern Tibet and geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(1): 104-112.
- ZHANG Hongfei, HARRIS N, PARRISH R, et al., 2004. Causes and consequences of protracted melting of the mid-crust exposed in the North Himalayan antiform[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 228(1-2): 195-212.
- ZHANG Jinjiang, 2007. A review on the extensional structures in the northern Himalaya and southern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 639-649(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhidan, LIU Dong, WANG Qing, et al., 2018. Zircon trace elements and their use in probing deep processes[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 124-135(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhidan, MO Xuanxue, DILEK Y et al., 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet[J]. *Lithos*, 113(1-2): 190-212.
- ZHAO Zhidan, MO Xuanxue, SUN Chenguang, et al., 2008. Mantle xenoliths in southern Tibet: geochemistry and constraints for the nature of the mantle[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 193-202(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zhidan, TANG Yan, ZHU Dicheng, et al., 2021. Distribution and its significance of dikes in southern Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3399-3412(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yuanchuan, HOU Zengqian, FU Qiang, et al., 2016. Mantle inputs to Himalayan anatexis: Insights from petrogenesis of the Miocene Langkazi leucogranite and its dioritic enclaves[J]. *Lithos*, 264: 125-140.